

科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」 研究概要
〔令和２年度中間評価用〕

令和２年６月３０日現在

<p>機関番号：12601</p> <p>領域設定期間：平成30年～令和4年</p> <p>領域番号：6007</p> <p>研究領域名（和文）宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。</p> <p>研究領域名（英文）Toward new frontiers：Encounter and synergy of state-of-the-art astronomical detectors and exotic quantum beams</p> <p>領域代表者</p> <p>高橋 忠幸（たかはし ただゆき）</p> <p>東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授</p> <p>研究者番号：50183851</p> <p>交付決定（予定）額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,093,000,000円</p>
--

研究の概要

本領域は、硬 X 線・ガンマ線イメージング技術、超高分解能 X 線分光技術など宇宙観測を目的に開発された革新的な先端検出器を、近年めざましい勢いで高強度化を果たした負ミュオンビーム、偏極 RI ビーム、高エネルギー光子ビームを用いた実験に応用すると共に、少数多体系理論を発展させ、過去成し得なかったレベルの超精密科学研究を実現することを目指す。医学・薬学研究者との分野融合研究を通じて、先端検出器を用いた計測技術の医学研究への応用を進める。負ミュオンの原子への捕獲反応を応用した「負ミュオン非破壊元素分析」、新たな「ミュオン触媒核融合サイクル」の確立をはかり、広く応用へ展開する。ガンマ線イメージャや超高分解能分光装置の高感度化、広帯域化を進めるとともに、負ミュオン超低速マイクロビームの開発など、領域発展に必要な横断的技術の研究開発を行う。

研究分野：量子ビーム関連科学，素粒子，原子核，宇宙線および宇宙物理に関連する実験，半導体，光物性および原子物理関連

キーワード：X 線・ γ 線測定，負ミュオンビーム

1. 研究開始当初の背景

本領域は、宇宙 X 線・ガンマ線観測のための最先端検出器の研究者が、負ミュオンビームを用いた加速器実験研究者という異分野の研究者に「出会った」ところに端を発する。宇宙観測検出器の技術を、高強度負ミュオンビームなどの量子ビームを用いた研究と結びつけ、新たな視点や手法による研究を共同で行うことを目的として本領域が立ち上がった。

2. 研究の目的

近年、加速器を用いて様々な高輝度量子ビームが作り出され、多彩な基礎科学研究が生み出されている。ところが、これらの研究は孤立して進められ、他の分野で高度に進んでいる理論研究や技術の進展に気付くことなく行われていることが多い。本領域では、宇宙 X 線・ガンマ線観測のために開発された最先端検出器技術と、負ミュオンビーム、高エネルギー光子ビーム、偏極を付加した放射性同位元素(RI)ビームという、日本が国際的に極めて優位な位置にある三つの「エキゾチック」な量子ビームの研究を結び付け、新たな視点や手法による研究を共同で行う。これにより、それぞれの基礎科学分野の研究を深化させるばかりではなく、元素分析から医学に至る異分野融合による応用研究において新しい展開を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本領域研究は、7つの研究領域から構成され、基礎科学、応用実験科学、分野横断技術開発の3つの研究分野に大別される。基礎科学分野では、超高分解能 X 線分光装置やテルル化カドミウム (CdTe) 半導体センサーを用いて、ミュオン特性 X 線の広帯域にわたる精密分光計測を行う。

また、高エネルギー電子ビームから生じる仮想光子を用いたラムダハイパー核の精密電磁分光を行い、 ΛN 相互作用の荷電対称性の破れ、中重ハイパー核のアイソスピン依存性など、バリオン力の研究を進める。本領域で進める少数多体系理論研究はこれらを繋ぐものとして位置づけられる。応用実験科学では、負ミュオン特性 X 線によるバルクな試料に対する非破壊 三次元 (3D) イメージング元素分析法を確立し、地球外試料や考古物などを対象とした研究を実施する。さらに、高強度負ミュオンビームを用い、新たに提唱する飛行中ミュオン触媒核融合 (In Flight μ CF; IF μ CF) サイクルの学術的研究を進める。元素依存性のない高偏極 RI ビームを生成し、RI を物質中の原子核と置換することで、 μ SR と相補的な役目を果たす β 線検出型超高感度 NMR 法による物質科学研究を創出する。分野横断技術開発分野においては、領域発展に必要な先端的検出器、負ミュオン超低速マイクロビームの開発などを推進する。さらに、がん幹細胞を標的とした医学研究のために CdTe 半導体素子を応用した小動物用生体内 3D ガンマ線イメージング装置の開発など、医学・薬学の研究者との異分野共同研究を展開する。

4. 研究の進展状況及び成果

本領域は 7 つの研究項目の協奏による異分野融合による新たな学術領域の展開を目指して進めている。特に C01 研究は広く医学、薬学研究者を取り込んで様々な展開を示している。当該研究グループが開発をつづけてきたエネルギー分解能の高いイメージングが可能な CdTe 半導体センサーによる小動物 SPECT 装置を用い、医学研究者や薬学研究者との異分野融合研究を組織し、*in vivo* 実験やがん細胞を移植した担がんマウスを用いた実験が行われている。例えばマウスのリンパ節、および甲状腺の複数核種同時イメージング実験では、マウス頸部の 1-2mm 程度の大きさの微細組織への異なる RI 化合物 (分子プローブ) の集積を、高い空間分解能で、かつ 3 核種同時に可視化することに成功した。

さらに、A01, B01, B02, C01, C02 に関連する実験が、当領域全体からの申請として J-PARC におけるミュオン共同利用 S1 型課題として採択され、様々な背景を持つ研究者が領域横断的に実験を遂行するという、従来にない新しい体制により、負ミュオンビームを利用する実験が開始された。

A01 では、重元素を含むミュオン原子のエネルギー準位に現れる強電場下の量子電磁力学 (QED) 効果を世界で初めて実験的に明らかにするため、超伝導 TES カロリメータを新たに導入してミュオン特性 X 線の精密分光を進めている。真空中に孤立したネオン原子から放出されるミュオン特性 X 線の絶対エネルギーを QED 効果の検証に必要な極めて高い精度で測定することに成功した。

B01 では A01, C01, C02 との連携のもと、負ミュオンによる非破壊元素分析法を発展させることを目的とする。極めて微量の隕石試料を用い、内部の酸素や炭素などの軽く、また生命の起源に関わる元素の存在を非破壊で計測する実験を進め、すでに 1mm 径の模擬試料数粒での測定に成功している。さらに C01 の CdTe イメージング分析装置を応用展開することで、トモグラフィの手法を用いた 3D イメージングの実験を実施した。

B02 では、将来のエネルギー源として期待されるミュオン触媒核融合 (μ CF) にブレークスルーを起こすため、従来とは異なる新たな「飛行中ミュオン触媒核融合 (In Flight μ CF; IF μ CF) サイクル」を提案し、原理実証を目指している。高密度水素ガスの電離しきい値より低い温度 (< 0.1 eV) で従来の μ CF と IF μ CF サイクルを組み合わせ、核融合後に放出される ^4He 原子核による加熱を利用しない D μ CF (Dual μ CF) サイクルが可能であることを理論的に見出した。

A02, B03 では光子ビームや RI ビームを用いた将来の新たな領域横断的研究展開に向けた技術開発を順調に進めている。

A02 では日米独自の電子加速器施設を用いて重い中性子星の謎を解くことを目指している。これまでに $^3\Lambda$ ハイパー核 ($nn\Lambda$; 原子番号 0 のラムダハイパー核) 探索実験を実施し、米国 JLab において世界初となる中重ハイパー核のアイソスピン依存性の精密測定に必要な大型偏向電磁石の設計・製作などを行った。

B03 では元素依存性のない高偏極 RI ビームの生成に向けて RI 原子線共鳴装置の開発を進めている。この装置を使った β 線検出型超高感度 NMR 法による物質科学研究の実現に向けて、 μ SR 法との相補的な物質科学研究を展開する。

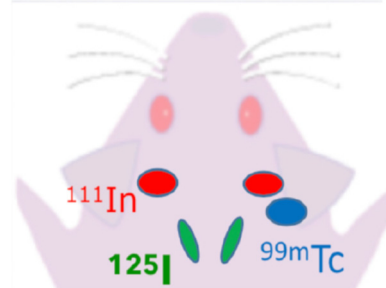
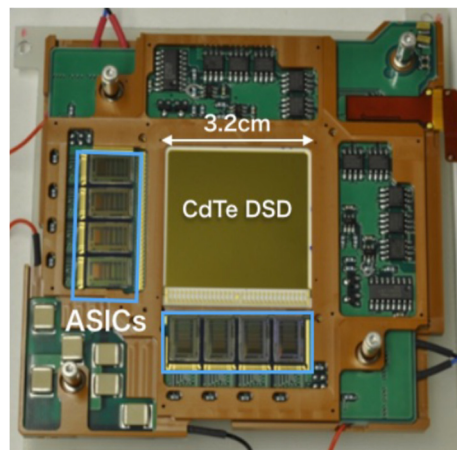


図: ASTRO-H (ひとみ) 衛星のために開発された CdTe イメージャ (上) とそれを用いて開発した SPECT 装置により、医学研究者と共同で、異なる核種で標識した 3 つの分子プローブを用いて、マウス頸部の異なる組織にそれぞれが集積する様子を高い空間分解能で、かつ 3 核種同時に可視化することに成功した (下 概念図)。

C02 では J-PARC の負ミュオン ビームラインにおいて、運動量のオンラインモニターやビームの自動調整プログラムの導入のほか、空気中へのビーム取り出しなどのビームラインの改良、高度化を行い、本領域横断的な貢献を行っている。同時に超低速負ミュオンビームを開発することで、物質表面の元素分布・同位体分布や化学結合分布を、非破壊、超高感度、3D、かつ数 10 ナノメートルの分解能（深さ方向は数 nm 分解能）で可視化する革新的な分析顕微鏡、走査負ミュオン顕微鏡の実現を目指している。

5. 今後の研究計画

本領域研究では、最先端検出器、エキゾチック量子ビーム技術をベースに基礎科学、応用実験科学、分野横断技術開発を強力に推進するために、引き続き7つの計画研究班の有機的な連携をはかり、新たな応用研究への道を切り開くことを目指す。公募研究は計画研究とは相補的に本領域研究を推進することができる研究テーマを選ぶ。

A01, B01 に加えて、ミュオン触媒核融合をベースに応用研究を展開する B02 と先端ビーム開発を進める C02 も含めて連携しながら、ミュオンビームを用いた基礎科学、応用研究を進める。

さらに、これまで宇宙観測から生まれた硬X線・ガンマ線イメージング技術をがん診断に応用する研究を進めるC01ではがん診断技術のさらなる展開と並行して、がんの転移や再発に関する研究、あるいはアルファ線治療など、より実用的技術に繋がる研究の深化を目指す。

6. 主な発表論文等（受賞等を含む）

- (1) S. Okada, T. Azuma, D.A. Bennett, P. Caradonna, W.B. Doriese, M.S. Durkin, J.W. Fowler, J.D. Gard, T. Hashimoto, R. Hayakawa, G.C. Hilton, Y. Ichinohe, P. Indelicato, T. Isobe, S. Kanda, M. Katsuragawa, N. Kawamura, Y. Kino, Y. Miyake, K.M. Morgan, K. Ninomiya, H. Noda, G.C. O'Neil, T. Okumura, C.D. Reintsema, D.R. Schmidt, K. Shimomura, P. Strasser, D.S. Swetz, T. Takahashi, S. Takeda, S. Takeshita, H. Tatsuno, Y. Ueno, J.N. Ullom, S. Watanabe, S. Yamada, X-ray spectroscopy of muonic atoms isolated in vacuum with transition edge sensors, *Journal of Low Temperature Physics*, <https://doi.org/10.1007/s10909-020-02476-5>. (A01, B01, B02, C01, C02 計画研究をまたぐ共同研究)
- (2) P. Klag, P. Achenbach, M. Biroth, T. Gogami, P. Herrmann, M. Kaneta, Y. Konishi, W. Lauth, S. Nagao, S.N. Nakamura, J. Pochodzalla, J. Roser, Y. Toyama, "Novel optical interferometry of synchrotron radiation for absolute electron beam energy measurements," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **910**, 147–156 (2018). (A02)
- (3) K. Ninomiya*, M. Kajino, M. Inagaki, K. Terada, A. Sato, D. Tomono, Y. Kawashima, A. Shinohara, "Per atom muon capture ratios and effects of molecular structure on muon capture by γ -Fe₂O₃ and Fe₃O₄", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **324**, 403-408 (2020). (B01)
- (4) T. Yamashita, Y. Kino, Relativistic corrections to the binding energy of positronic alkali-metal atoms, *Phys. Rev. A*, **100** (2019) 062511. (B02)
- (5) F. Boulay, A. Takamine (6th/23), H. Ueno (45th), H. Yamazaki (46th) *et al.*, " α -Factor of the ⁹⁹Zr (7/2⁺) isomer: Monopole evolution in shape coexisting region," *Phys. Rev. Lett.* **124**, 112501-1-6 (2020). (B03)
- (6) T. Nakano, M. Sakai, K. Torikai, Y. Suzuki, S. Takeda, S. Noda, M. Yamaguchi, Y. Nagao, M. Kikuchi, H. Odaka, T. Kamiya, N. Kawachi, S. Watanabe, K. Arakawa and T. Takahashi, "Imaging of ^{99m}Tc-DMSA and ¹⁸F-FDG in humans using a Si/CdTe Compton camera", *Phys. Med. Biol.* **65** (2020). (C01)
- (7) K. Furukawa, S. Nagasawa, L. Glesener, M. Katsuragawa, S. Takeda, S. Watanabe, T. Takahashi, "Imaging and spectral performance of a 60 μ m pitch CdTe double-sided strip detector", NIMAP, accepted for publication (2020). (C01)
- (8) M. Otani, R. Kitamura, Y. Fukao, K. Hasegawa, K. Ishida, N. Kawamura, Y. Kondo, Y. Miyake, N. Saito, K. Shimomura, and P. Strasser, "Response of microchannel plates to positrons from muon-decays", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **943** (2019) 162475(1-4). (C02)

(受賞)

- (1) 二宮和彦 (B01, 大阪大学), 2019 年度 日本中間子科学会 奨励賞, 2020 年 3 月 6 日
- (2) Y. Toyama (A02, 東北大学), GPPU Excellent Student Award, March 3 2020.
- (3) 馬場彩 (A01, 東京大学), 日本物理学会 第 1 回米沢富美子記念賞, 2020 年 2 月 17 日
- (4) 小高裕和 (C01, 東京大学), 第 14 回日本物理学会若手奨励賞, 2019 年 10 月
- (5) K. Uehara (A02, 東北大学), International School for Strangeness Nuclear Physics (SNP School 2019) Incentive Prize, September 5-8, 2019.,

ホームページ等

「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」ホームページ
https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/index.html